



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>
УДК 669

Поступила 01.11.2024
Received 01.11.2024

СТРУКТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УПРОЧНЕНИЯ И ПЛАСТИЧНОСТИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Российская Федерация. E-mail: olga1560@yandex.ru

При деформации растяжением выполнен анализ зависимости известных показателей деформационного упрочнения и пластичности от размера зерна феррита в низкоуглеродистой стали и межпластиночного расстояния в перлитной стали. Показатели степени относительного прироста прочности позволяют контролировать деформационное упрочнение в областях равномерного, сосредоточенного растяжения и характеризуются повышенной структурной чувствительностью на всех стадиях растяжения по сравнению со скоростью деформационного упрочнения и показателем его степени. Относительное сужение и показатель истинной деформации уступают по структурной зависимости пластичности показателю степени относительного уменьшения площади поперечного сечения. Контроль при растяжении показателей степени относительного прироста прочности, степени относительного уменьшения площади поперечного сечения и обратной величины длины площадки текучести обеспечивает предварительную оценку деформируемости при волочении катанки из углеродистой стали.

Ключевые слова. Дисперсность структуры, степень деформационного упрочнения, скорость деформационного упрочнения, степень относительного прироста прочности, степень относительного уменьшения площади поперечного сечения при растяжении, деформируемость катанки.

Для цитирования. Фетисов, В.П. Структурная чувствительность показателей упрочнения и пластичности углеродистой стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 81–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>.

STRUCTURAL SENSITIVITY OF STRENGTHENING AND DUCTILITY INDICES IN CARBON STEEL

V.P. FETISOV, Orel, Russian Federation. E-mail: olga1560@yandex.ru

This study analyzes the dependence of well-known indicators of strain hardening and ductility on ferrite grain size in low-carbon steel and on interlamellar spacing in pearlitic steel under tensile deformation. Indicators of the degree of relative strength increase allow for control over strain hardening in both uniform and localized tensile regions and exhibit enhanced structural sensitivity at all stages of tension, compared to the strain hardening rate and strain hardening exponent. Relative narrowing and the true strain indicator show less structural dependence on ductility compared to the degree of relative cross-sectional area reduction. Monitoring the degree of relative strength increase, the degree of relative cross-sectional area reduction, and the inverse length of the yield plateau during tensile testing provides a preliminary assessment of drawability for carbon steel wire rod.

Keywords. Structure dispersion, strain hardening degree, strain hardening rate, degree of relative strength increase, degree of relative cross-sectional area reduction in tension, wire rod deformability.

For citation. Fetisov V.P. Structural sensitivity of strengthening and ductility indices in carbon steel. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 81–84. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-81-84>.

Предварительная оценка деформационного упрочнения и пластичности углеродистой катанки необходима для повышения эффективности технологического процесса волочения холоднодеформированной проволоки. Поэтому поиск надежных показателей деформационного упрочнения и пластичности имеет важное практическое значение.

Целью настоящей статьи является выявление наиболее структурно-чувствительных показателей интенсивности деформационного упрочнения и пластичности углеродистой стали.

Для линейного растяжения зависимость между напряжением и деформацией обычно описывается эмпирическими уравнениями Людвига [1]:

$$\sigma = \sigma_0 + h\varepsilon_p^m, \quad (1)$$

где ε_p – истинная пластическая деформация; σ_0 – напряжение течения при $\varepsilon_p = 0$; h, m – параметры деформационного упрочнения

и Холломона [2]:

$$\sigma = K\varepsilon^n, \quad (2)$$

где n – показатель степени деформационного упрочнения; K – коэффициент упрочнения, постоянный для данного материала, $K = \sigma$ при $\varepsilon = 1$.

Однако область применения указанных эмпирических выражений ограничена стадией равномерного растяжения. Кроме того, исследования уравнения (1) в зависимости от температуры и скорости деформации показали отрицательные значения параметров деформационного упрочнения σ_0 , h и m [3], что обусловлено наличием на кривой растяжения площадки текучести. Указанный недостаток характерен и для уравнения (2), для устранения которого в [4] использовано выражение

$$\sigma = K(\varepsilon_{\text{общ}} - \varepsilon_T)^n, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{общ}}$ – истинная общая деформация; ε_T – истинная деформация в конце площадки текучести.

Для однократного волочения деформационное упрочнение проволоки, нарастающее в двойных логарифмических координатах по прямолинейной зависимости, описывается выражением, по форме соответствующим уравнению Холломона [5]:

$$\sigma_B = \sigma_B^* (\ln m)^{n_B}, \quad (4)$$

где n_B – показатель степени деформационного упрочнения при волочении; σ_B^* – коэффициент прочности, равный σ_B при $\ln m = 1$; $\ln m$ – истинная степень деформации при волочении (m – вытяжка, равная отношению квадратов диаметра проволоки до и после волочения).

В [4] в качестве параметров деформационного упрочнения использованы показатели степени относительного прироста прочности:

$$Y_{\sigma 0,05} = (\sigma_{0,05} - \sigma_T) / \sigma_T,$$

$$Y_{\sigma B} = (\sigma_B - \sigma_T) / \sigma_T,$$

включающие предел текучести с его повышенной структурной чувствительностью, а также истинное напряжение $\sigma_{0,05}$ для фиксированной степени деформации $\varepsilon = 0,05$ и временное сопротивление разрыву, структурная зависимость которого теоретически и экспериментально обоснована [6] и не вызывает сомнений.

Влияние дисперсности структуры на изменение показателей деформационного упрочнения $Y_{\sigma 0,05}$, $Y_{\sigma B}$, n (уравнение (2)) и n_B представлено в табл. 1, 2 [5]. При деформации растяжением стали 15кп переход от n к $Y_{\sigma 0,05}$ и $Y_{\sigma B}$ увеличивает отношение экстремальных значений соответственно в 1,60 и 1,54 раза, а для стали 80 – в 1,52 и 1,62 раза. При волочении катанки СтОм ($C = 0,11\%$) с различным размером зерна феррита рост отношений экстремальных значений составляет 1,45 раза: с 2,14 для n_B до 3,10 для $Y_{\sigma B}$.

Таблица 1. Влияние размера зерна феррита в стали 15кп (d) и межпластиночного расстояния в перлите стали 80 (Δ) на показатели деформационного упрочнения при растяжении со скоростью 10^{-4} с^{-1} при температуре 20°C

Дисперсность структуры	Показатель		
	n	$Y_{\sigma 0,05}$	$Y_{\sigma B}$
Сталь 15кп, d , мм:			
0,016	0,20	0,33	0,52
0,022	0,33	0,49	0,68
0,042	0,34	0,70	0,99
0,069	0,35	0,85	1,23
0,110	0,37	0,98	1,48
Отношение экстремальных значений	1,85	2,97	2,85
Сталь 80, Δ , мкм:			
0,088	0,14	0,43	0,38
0,142	0,17	0,49	0,42
0,296	0,20	0,93	0,91
0,540	0,22	1,03	0,97
Отношение экстремальных значений	1,57	2,39	2,55

Применение показателей степени относительного прироста прочности позволило выявить повышенную склонность к упрочнению для равномерного растяжения $Y_{\sigma \text{равн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02}) / \sigma_{02}$ по сравнению с деформацией при разрушении шейки $Y_{\sigma \text{разр}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}}) / \sigma_{\text{равн}}$ [7] и при однократном волочении $Y_{\sigma \text{в}} = (\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{во}}) / \sigma_{\text{во}}$ [8].

Таблица 2. Влияние размера зерна феррита в катанке СтОм на временное сопротивление разрыву и показатели деформационного упрочнения

Параметр	Размер зерна феррита, балл				Отношение экстремальных значений
	5–6	7–8	8–9	10–11	
σ_B , Н/мм ²	303,8	369,8	386,9	492,7	1,62
n_B	0,30	0,21	0,19	0,14	2,14
Y_{σ_B}	0,62	0,48	0,41	0,20	3,10

В табл. 3 [9] для тонкопластинчатой перлитной стали 80 показано влияние дисперсности структуры на изменение показателей скорости деформационного упрочнения в области равномерной ($J_{\text{равн}}$) и сосредоточенной ($J_{\text{соср}}$) деформации растяжением [10] в сравнении с показателями $Y_{\text{бравн}}$ и $Y_{\text{бразр}}$. Экспериментальные данные свидетельствуют о повышенной структурной зависимости показателей степени относительного прироста прочности: в 1,3 раза для $Y_{\text{бравн}}$ и 1,07 раза для $Y_{\text{бразр}}$.

Таблица 3. Влияние дисперсности перлита в стали 80 на механические свойства и показатели интенсивности деформационного упрочнения при растяжении со скоростью 10^{-2} с^{-1} при температуре 20 °С

Параметр	Межпластиночное расстояние в перлите Δ , мкм		Отношение экстремальных значений
	0,088	0,142	
σ_{02} , Н/мм ²	980	833	1,18
$\sigma_{\text{равн}}$, Н/мм ²	1194	1127	1,06
$\sigma_{\text{разр}}$, Н/мм ²	2009	1661	1,21
$\Psi_{\text{равн}}$, %	6,1	6,9	1,13
$\Psi_{\text{разр}}$, %	57	52,5	1,09
$\Delta\Psi = \Psi_{\text{разр}} - \Psi_{\text{равн}}$	50,9	45,6	1,12
$J_{\text{равн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02})/\Psi_{\text{равн}}$	3,57	4,35	1,22
$J_{\text{соср}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}})/\Delta\Psi$	1,63	1,195	1,36
$Y_{\text{бравн}} = (\sigma_{\text{равн}} - \sigma_{02})/\sigma_{02}$	0,22	0,35	1,59
$Y_{\text{бразр}} = (\sigma_{\text{разр}} - \sigma_{\text{равн}})/\sigma_{\text{равн}}$	0,68	0,47	1,45

Примечание. Расчеты показателей $J_{\text{равн}}$ и $J_{\text{соср}}$ выполнены для напряжений в кгс/мм².

В [11] традиционные пластические характеристики, определяемые на базе изменения при растяжении площади поперечного сечения образца (относительное сужение $\Psi = (F_0 - F_k)/F_0$, %, и истинная деформация $\varepsilon_\Psi = \ln F_0/F_k$), дополнены показателем степени относительного уменьшения площади поперечного сечения $Y_\Psi = (F_0 - F_k)/F_k$, которое по структурной чувствительности превосходит показатели Ψ , %, и ε_Ψ соответственно в 1,8 и 1,4 раза (табл. 4).

Таблица 4. Влияние дисперсности перлита на показатели пластичности при растяжении стали 80 со скоростью 10^{-3} с^{-1} при температуре 20 °С

Межпластиночное расстояние в перлите Δ , мкм	Показатель пластичности		
	Ψ , %	ε_Ψ	Y_Ψ
0,088	55	0,80	1,22
0,142	48	0,65	0,92
0,296	31	0,37	0,45
0,540	15	0,16	0,18
Отношение экстремальных значений	3,67	5,0	6,78

Высокая структурная зависимость характерна также для показателей предварительной оценки деформируемости углеродистой катанки, включающих Y_{σ_B} и Y_Ψ для перлитной стали ($\Pi_{\text{ДС}} = Y_{\sigma_B} + Y_\Psi$) [12] и Y_{σ_B} и $Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$ для низкоуглеродистой стали ($\Pi_{\text{Д}} = Y_{\sigma_B} + Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$) [13], где $Y_{\ell_{\text{ПТ}}}$ (обратная величина длины площадки текучести) отражает склонность к локализации пластической деформации в зависимости от размера зерна феррита. Надежность предварительного контроля деформационной способности с помощью показателей $\Pi_{\text{ДС}}$ и $\Pi_{\text{Д}}$ подтверждается их равнонаправленной зависимостью от структурного состояния с максимальной вытяжкой однократного волочения при прямом методе оценки деформируемости катанки [12, 13].

Выводы

1. Показатели степени относительного прироста прочности позволяют контролировать интенсивность деформационного упрочнения в областях равномерного и сосредоточенного растяжения, а также характеризуются повышенной структурной чувствительностью на всех стадиях растяжения по сравнению со скоростью деформационного упрочнения и показателем его степени.

2. Показатель степени относительного уменьшения площади поперечного сечения превосходит по зависимости от изменения структурных параметров относительное сужение и показатель истинной деформации.

3. Критерии деформируемости на базе степеней относительного прироста прочности, относительного уменьшения площади поперечного сечения и обратной величины длины площадки текучести надежно обеспечивают предварительную оценку деформационной способности при волочении катанки из углеродистой стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ludwik, P. *Elemente der technologischen Mechanik* / P. Ludwik. – Berlin: Julius Springer, 1909. – P. 32.
2. Hollomon, J. H. Tensile Deformation / J. H. Hollomon // *Trans AIME*. – 1945. – Vol. 162. – P. 268–290.
3. Ramani, S. V. The work-hardening parameters of polycrystalline materials / S. V. Ramani, P. Rodriguez // *Scr. Met.* – 1970. – Vol. 4, no. 10. – P. 755–760.
4. Фетисов, В. П. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В. П. Фетисов. – Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996. – 120 с.
5. Фетисов, В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В. П. Фетисов. – М.: Мир, 2005. – 200 с.
6. Гриднев, В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 231 с.
7. Фетисов, В. П. Формирование пластических свойств при деформации растяжением перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2023. – № 2. – С. 61–63.
8. Фетисов, В. П. Исследование интенсивности деформационного упрочнения низкоуглеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 4. – С. 64–67.
9. Фетисов, В. П. Влияние дисперсности структуры на интенсивность упрочнения при растяжении перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2024. – № 3. – С. 35–36.
10. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – Т. 2. – 416 с.
11. Фетисов, В. П. Оценка пластичности при деформации углеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 85–88.
12. Фетисов, В. П. Контроль способности к волочению катанки из углеродистой стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 3. – С. 61–64.
13. Фетисов, В. П. Контроль деформируемости при волочении низкоуглеродистой катанки / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 3. – С. 61–63.

REFERENCES

1. Ludwik P. *Elemente der technologischen Mechanik*. Berlin, Julius Springer Publ., 1909, p. 32.
2. Hollomon J. H. Tensile Deformation. *Trans AIME*, 1945, vol. 162, pp. 268–290.
3. Ramani S. V., Rodriguez P. The work-hardening parameters of polycrystalline materials. *Scr. Met.*, 1970, vol. 4, no. 10, pp. 755–760.
4. Fetisov V. P. *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Strain aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
5. Fetisov V. P. *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Strain hardening of carbon steel]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.
6. Gridnev V. N., Gavriljuk V. G., Meshkov Yu. Ya. *Prochnost' i plastichnost' holodnodeformirovannoj stali* [Strength and plasticity of cold-deformed steel]. Kyiv, Naukova Dumka, 1974, 231 p.
7. Fetisov V. P. Formirovanie plasticheskikh svoystv pri deformacii rastyazheniem perlitnoj stali [Formation of plastic properties during deformation stretching of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 61–63.
8. Fetisov V. P. Issledovanie intensivnosti deformacionnogo uprochneniya nizkouglerodistoj stali [Investigation of the intensity of strain hardening of lowcarbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 64–67.
9. Fetisov V. P. Vliyanie dispersnosti struktury na intensivnost' uprochneniya pri rastyazhenii perlitnoj stali [The influence of structure dispersity on the intensity of hardening during tensile testing of pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 3, pp. 35–36.
10. Gubkin S. I. *Plasticheskaya deformaciya metallov* [Plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961, vol. 2, 416 p.
11. Fetisov V. P. Ocenka plastichnosti pri deformacii uglerodistoj stali [Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 85–88.
12. Fetisov V. P. Kontrol' sposobnosti k volocheniyu kataniki iz uglerodistoj stali [Controlling the drawability of carbon steel wire rod]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 61–64.
13. Fetisov V. P. Kontrol' deformiruемости pri volochenii nizkouglerodistoj kataniki [Control of deformability during drawing of lowcarbon wire rod]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 61–63.